

II-280

河床波形成河道の摩擦抵抗の評価と流砂量の算定

舞鶴工業高等専門学校 正員 三輪 浩
立命館大学 理工学部 正員 大同淳之

1. まえがき 河床波が形成された河道の流砂量は、有効掃流力が抵抗分割によって得られる摩擦抵抗と同一であるとの前提のもとに算定されている。しかし、実際には河床に作用するせん断応力は場所的に一定ではないために非平衡な流砂現象となり、摩擦抵抗と有効掃流力を同一視した議論では不十分である。そこで、本文では砂堆河床を対象としてその背面に沿うせん断応力分布を算定し、これから得られる河床の局所摩擦抵抗に基づく非平衡流砂量式を求める。そして、この結果を用いて平均流砂量の算定を行う。

2. 実験概要 実験は長さ6.5m、幅20cmの亚克力製可変勾配水路を用いて行った。まず、せん断応力分布算定の算定に関するデータの収集のため、三角形の砂堆模型を水路に敷き詰めて固定床とし、染料(ローダミンB)を用いて剥離域の長さを測定するとともに、直径3mmのプロペラ流速計を用いて砂堆波背面の流速分布を測定した。なお、模型の表面は $d=0.074\text{cm}$ の粗度を有している。つぎに、流砂量を測定するために、河床が平衡状態に達した後、砂堆1波長分の砂を採取した。表-1は移動床の実験条件である。

表-1 実験条件

Run No.	$q_w(\text{cm}^2/\text{s})$	$d_m(\text{cm})$	$h_m(\text{cm})$	$I_e \times 10^{-3}$
U-6D	350	0.057	9.56	2.11
U-6E	350	0.057	9.34	2.79
U-6F	350	0.057	10.26	2.40
U-7D	400	0.057	10.37	3.11
U-7E	400	0.057	10.02	3.23
U-7F	400	0.057	9.75	3.25
U-9D	450	0.093	9.78	2.21
U-9F	450	0.093	9.48	2.19
U-9G	450	0.093	9.78	2.34

3. せん断応力分布と摩擦抵抗 河床波の背面では再付着点から河床に沿って新たに境界層が発達し、底面せん断力はこれによって規定される。さて、非圧縮性二次元流れの境界層の運動量方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial (U \delta^*)}{\partial t} + U^2 \frac{\partial \theta}{\partial x} + (2\theta + \delta^*) U \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\delta(x)}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\tau(x, t)}{\rho} \quad (1)$$

ここに、 U は境界層外えん流速、 δ^* は排除厚、 θ は運動量厚、 δ は境界層厚、 p は圧力である。

流れを定常と仮定、水面波を無視して河床形状による水深変化を考慮し、境界層内の流速分布を式(2)で、境界層外えん流速を中川・辻本¹⁾による式(3)で表すと、結局せん断応力分布は式(4)で表される。

$$u(y)/U = (y/\delta)^{1/6} \quad (2), \quad U/u_m = B(x/h_m)^{1/2} \quad (3)$$

$$\frac{\tau(x)}{\rho u_m^2} = \Pi \left(\frac{k_s}{h_m} \right) \left(\frac{x}{k_s} \right)^{3/4} \quad (4)$$

ここに、 $u(y)$ は境界層内流速分布、 u_m は平均流速、 h_m は平均水深、 $\Pi = (B/A)^2 C^{-1/4}$ 、 $A=8.94$ 、 $B=\{2/(2-L/h_m \cdot \lambda)\} \{L/h_m \cdot (1-5.1 \cdot \lambda)\}^{-1/2}$ 、 $C=A^{-2} \{0.25 + \lambda / (Fr \cdot B)^2\}$ 、 L は波長、 λ は波形勾配である。

図-1は河床波背面の底面摩擦速度の分布形状について、式(4)と中川・村上²⁾による $K-\epsilon$ モデルを用いた結果との比較を示している。再付着点付近で摩擦速度の増加が大きく見られるが、全体としては同じ傾向を示している。式(4)より、河床の摩擦抵抗は次式で求められる。

$$\tau' = \rho u_*'^2 = \rho / L \left\{ \int_0^{L_s} u_*'(x)^2 dx \right\} \quad (5)$$

図-2は全抵抗と式(5)から求められる摩擦抵抗との関係を示したものである。同図にはUSGSの砂堆に関するデータ³⁾も記入した。図から分かるように、砂堆領域の広い条件範囲で次式が成り立つ。

$$\tau_*' = 0.25 \tau_*'^{1/2} \quad (6)$$

図-3は式(6)を用いて摩擦抵抗を求め、Meyer-Peter-Mullerの流砂量式で計算した砂堆河床の平均流砂量の実験結果と計算結果を比較したものである。同図より平均流砂量については良好な結果が得られているといえる。

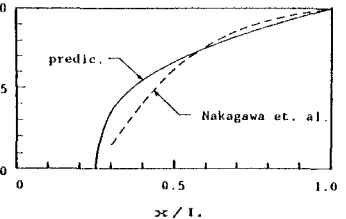


図-1 底面摩擦速度の分布形状

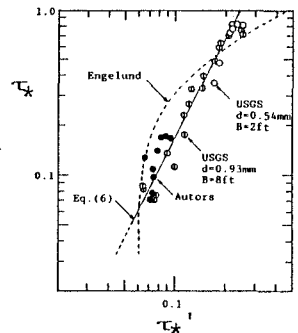


図-2 τ_* と τ_*' の関係

4. 非平衡流砂量式と河床波上の流砂量分布 河床波の背面では、再付着点付近の顕著な乱れや流れの加速などによってせん断応力が場所的に変化し、流砂は非平衡な状態にある。また、これにともなう pic-up rate や step length も場所的に異なる複雑な流砂運動となっている。いま、場所的に変化する流砂量 $q_B(x)$ について、単位時間単位面積当たりの粒子の離脱量を E 、堆積量を D とすると、質量保存則より次式を得る。

$$d q_B(x) / d x = E(x) - D(x) \quad (7)$$

$p_s(x)$ を x の位置における pic-up rate、 $\Lambda(x)$ を step length として、 $E(x) = (k_3/k_2) p_s(x) d$ 、 $D(x) = q_B(x) / \Lambda(x)$ とすると、式(7)は

$$d q_B(x) / d x = K p_s(x) - q_B(x) / \Lambda(x) \quad (8)$$

となる。式(8)の解は次式によって与えられる。

$$q_B(x) = \exp \left\{ - \int \frac{1}{\Lambda(x)} dx \right\} \left[K \int p_s(x) \cdot \exp \left\{ \int \frac{1}{\Lambda(x)} dx \right\} dx + c \right] \quad (9)$$

再付着点付近では鉛直方向に強い乱れが発現し、この流下方向の変化や背面での加速流が流砂運動に副次的に影響を及ぼしているため、pic-up rate や step length は平坦河床の場合とは相当異なることが予想される。そこで、本文では pic-up rate は Nakagawa ら⁴⁾ が行った実験結果をもとに次式で与える。なお、図-4は実験結果と式(10)を示したものである。

$$p_{sx} = 1.7 \times 10^{-2} \tau_*^{4/3} \quad (10)$$

一方、step length については、平衡流砂量式と pic-up rate 式から逆算によって求められている。しかし、河床波上ではその妥当性が十分に検討できていないこと、また掃流力の変化に対する pic-up rate の応答性に比べて step length は鈍感であることを考え、本文では一定値をとるものとし、 $\Lambda = 100 d$ (11) を用いる。

step length が場所的に変化しないとすると、式(9)は次式のように簡単になる。

$$q_B(x) = \exp \left(- \frac{x}{\Lambda} \right) \left[K' \left\{ \int p_s(x) \exp \left(\frac{x}{\Lambda} \right) dx \right\} + c \right] \quad (12)$$

さて、式(12)を用いて河床波上の流砂過程を記述するには、式(10)で表された pic-up rate を河床波上の位置と関係づけて評価する必要がある。式(4)は、 $\tau_* = \Pi' (x/k_s)^{3/4}$ (13) と書けるので、式(10)と(13)から pic-up rate は $p_s = \Pi'' x$ (14) となる。ここに、 $\Pi'' = 0.017 \Pi' \{ (s \cdot g) / (d \cdot k_s) \}^{1/2}$ である。式(14)を式(12)に代入し、 $x=0$ で $q_B=0$ の条件を与えると、結局、流砂量の分布は次式で表される。

$$\frac{q_B(x)}{q_{Bc}} = \frac{p_s(x - \Lambda)}{p_s(x_c - \Lambda)} \{ 1 - \exp \left(- \frac{x}{\Lambda} \right) \} \quad (15)$$

ここに、 q_{Bc} はクレストの流砂量、 x_c はクレストの位置である。

さて、 q_{Bc} は平均流砂量を用いて、 $q_{Bc} \doteq 2 q_B$ (16) と表されるので、前節の結果を用いて、式(15)と(16)から局所流砂量を求めることができる。図-5は Nakagawa ら⁴⁾ によって測定された河床波上の流砂量変化と本手法による計算結果を示したものである。

5. あとがき 砂堆背面の掃流力分布をもとに、河床の摩擦抵抗の

算定法について検討し、平均流砂量が適切に表されることを示した。さらに、非平衡流砂量式から河床波上での流砂量変化の算定を行った。本文では step length や pic-up rate に関する検討が十分でないので、今後、その理解を深め、より精度の高いモデルを構築するつもりである。なお、本研究の一部は(財)日本科学協会平成2年度科学研究奨励助成を受けて行われたものである。記して謝意を表します。

参考文献 1) 中川・辻本・村上他：第28回水講演文集、1984。 2) 中川・村上・後藤：水工学論文集、第34巻、1990。 3) Guy, H.P., D.B. Simons and E.V. Richardson: USGS Professional Paper, 462-I, 1965。 4) Nakagawa, H., T. Tsujimoto and S. Murakami: Proc. 6th Cong. APD-IAHR, 1988。

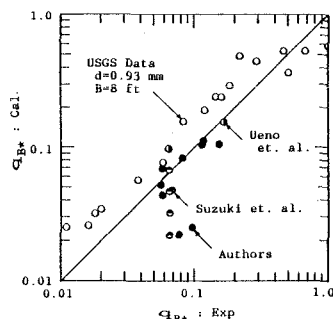


図-3 流砂量の評価

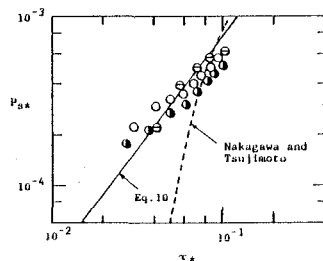


図-4 河床波上の p_s の評価

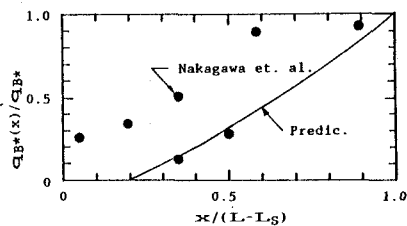


図-5 河床波上の流砂量分布